

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.02.020

引用格式:郑艺,王玉文,邓杰,等.高空平台站空地链路信道建模与 QualNet 仿真[J].电讯技术,2014,54(2):224-230. [ZHENG Yi, WANG Yu-wen, DENG Jie, et al. Modeling and QualNet Simulation of Air-Ground Link Channel for High Altitude Platform Station[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(2): 224-230.]

高空平台站空地链路信道建模与 QualNet 仿真*

郑 艺**,王玉文,邓 杰,尚小富

(电子科技大学 航空航天学院,成都 611731)

摘 要:高空平台站通信是实现中继通信的重要手段,其受大气效应及多径效应制约严重,但网络仿真器中缺少针对高空平台通信系统的准确信道模型,无法进行有效的仿真分析。为此,从分析 ITU-R 模型与 Ricean 模型出发,在此基础上改进 QualNet 仿真器内置的信道模型,使之基本实现对真实空地链路信道的近似模拟,将该信道模型应用于网络仿真中,并分析信道特性对空地链路性能的影响。最后,搭建了基于 QualNet 的半实物仿真平台,进一步增强了空地链路仿真的准确性和合理性。该信道模型及仿真平台对高空平台站通信系统的参数设计、性能分析具有重要意义。

关键词:高空平台站;空地链路;信道模型;QualNet 仿真

中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)02-0224-07

Modeling and QualNet Simulation of Air-Ground Link Channel for High Altitude Platform Station

ZHENG Yi, WANG Yu-wen, DENG Jie, SHANG Xiao-fu

(School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: High Altitude Platform station (HAPs) communication is an important way to realize relay communications. Its performance is seriously restricted by the atmospheric effect and multipath effect, however, network simulators lack a realistic air-ground link channel model which would allow having accurate simulation, so it is difficult to perform effective simulation and analysis. According to the analysis of ITU-R model and Ricean model, the channel model in QualNet is improved for the purpose of realizing the approximate simulation of the real air-ground link channel basically. The channel model is used in network simulation, and the influence of characteristics of channel on air-ground link performance is analyzed. Finally, hardware in the loop (HITL) simulation platform is built based on QualNet to further enhance the accuracy and rationality of the air-ground link. The channel model and simulation platform are helpful for HAPs communication system parameters selection and performance evaluation.

Key words: high altitude platform station; air-ground link; channel model; QualNet simulation

1 引 言

近年来,高空平台通信网络的研究吸引了人们越来越多的兴趣与注意,由于采用无线通信方式,空

地链路通信过程中的信号在空间中传播就不可避免地受到自然环境的影响,例如降雨、云雾、大气吸收和多径效应等。这些效应是动态的,与场景关联的。

* 收稿日期:2013-10-18;修回日期:2014-01-07 Received date:2013-10-18;Revised date:2014-01-07
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AAXX)
Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program(863 Program) of China (2012AAXX)
** 通讯作者:zhy_uestc@163.com Corresponding author: zhy_uestc@163.com

因而准确揭示和模拟它们对网络性能的影响成为了目前的一项挑战。已有的高空平台的网络仿真中,对信道模型方面考虑十分理想,影响了仿真结论的准确性。因此,对空地链路信道建模仿真,以表现其对高空平台空地链路性能的影响,便成为了目前研究的现实需求。

高空平台站信道建模仿真方面的研究已经开展了一段时间;文献[1]研究了高空平台站通信的小尺度衰落模型;文献[2]详细研究了多天线信道模型;文献[3]总结并且分析了应用于高空平台站通信的信道模型,揭示了各个模型的优势与劣势;施春强^[4]等人从多径衰落和降雨衰减两个方面综合考虑,建立了一种信道统计模型。

上述文献的研究者一般通过建立数学模型来模拟高空平台通信信道,并采用 Matlab 仿真来进一步研究空地链路信道的各种特性。这种传统方法在对高空平台通信系统进行仿真的信道问题中并不适用。另外,目前常用的网络仿真器,如 OPNET、QualNet 和 NS-2,只是提供了一些简单的传播模型,并不能直接用于高空平台站空地链路信道的建模仿真中。

本文将对高空平台站通信中的空地链路信道进行建模仿真,其中主要研究雨衰、云衰、大气吸收衰减等路径损耗和由于多径效应引起的小尺度衰落。以 QualNet 为平台并使用 C 语言编程,建立适用于高空平台站的空地链路信道模型,并搭建了基于 QualNet 的半实物仿真系统。

2 空地链路信道建模

2.1 空地链路路径损耗模型

路径损耗,又称为大尺度衰落。高空平台站空地链路的路径损耗的影响因素主要有自由空间损耗、雨衰、云衰、大气吸收衰减。目前,针对上述的衰减存在一些模型,但工程中应用最广泛的是 ITU-R 模型,因此本文在 QualNet 网络仿真器中主要对该系列模型进行研究。

2.1.1 雨衰模型

电磁波受雨滴的吸收和散射影响而产生的衰减称为雨衰,它主要与雨滴的几何尺寸、降雨强度、雨区范围、信号频率、极化方式等有关。对于 10 GHz 以上的频段,雨衰是影响通信链路质量的一个主要因素。目前对雨衰的研究比较深入,建立了许多模型,主要有 ITU-R 模型^[5-8]、SAM 模型^[9]、DAH 模

型^[10]等。

ITU-R 雨衰模型预计超过年均时间 0.01% 的衰减 $A_{0.01}$ (dB),可用式(1)计算:

$$A_{0.01} = r_R L_E \tag{1}$$

式中, r_R 为 0.01% 时间内的特定衰减 (dB/km), L_E 为有效路径长度 (km)。

对于预测衰减超过年均为 p (0.001% ~ 10%) 的情形是通过式(2)得到的。

$$A_R(p) = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-[0.655+0.033\ln(p)-0.045\ln(A_{0.01})-\beta(1-p)\sin\theta]} \tag{2}$$

式中,若 $p \geq 1\%$,则 $\beta=0$;若 $p < 1\%$,则 β 可以通过式(3)计算得到:

$$\beta = \begin{cases} 0, & |\varphi| \geq 36^\circ \\ -0.005(|\varphi|-36), & |\varphi| < 36^\circ \text{ 且 } \theta \geq 25^\circ \\ -0.005(|\varphi|-36)+1.8-4.25\sin\theta, & |\varphi| < 36^\circ \text{ 且 } \theta < 25^\circ \end{cases} \tag{3}$$

2.1.2 云衰减模型

云通常是由小水滴组成,这些小水滴的直径一般小于 0.01 cm,它们对电波的衰减主要是由吸收引起的。云衰减的大小与沿着传播路径的液体水的含量及温度有关。

为了获得给定概率的云衰减,液态水的总含量 L (kg/m²) 或者给定地点的降水量必须事先得到。ITU-R 建议中计算空地链路中的云衰减预测模型^[11]的损耗值 A_c (dB) 表达式为

$$A_c = \frac{LK_l}{\sin\theta}, \quad 90^\circ \geq \theta \geq 5^\circ \tag{4}$$

式中, θ 是仰角, K_l 为比衰减系数, K_l 可以由式(5)计算得到:

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \tag{5}$$

其中, f 为频率 (GHz)。

2.1.3 大气吸收衰减模型

大气吸收衰减完全是由于大气吸收引起的,而该衰减主要取决于频率、仰角、海拔高度和水蒸气的密度(绝对湿度)。当频率低于 10 GHz,该衰减可以忽略不计,但是当频率高于 10 GHz 时,其衰减随着频率的增加而增加,特别是对于低仰角的情况尤其明显。

ITU-R 计算大气吸收衰减 A_c (dB) 的公式^[12]为

$$A_c = \frac{h_o\gamma_o+h_w\gamma_w}{\sin\varphi} \tag{6}$$

式中, h_0 为干燥空气的等效高度 (km), h_w 为水蒸气的等效高度 (km), r_0 为干燥空气衰减系数 (dB/km), r_w 为水蒸气衰减系数 (dB/km)。

2.1.4 综合路径损耗模型

综合路径损耗是综合考虑了雨衰、云衰、大气吸收衰减等因素的影响。对于频率在 18 GHz 以上或者低仰角情况下的通信, 更加需要综合考虑大气效应的总体衰减^[5]。计算给定概率的总体衰减 $A_T(p)$ 的一般方法如下:

$A_T(p) = A_C(p) + \sqrt{(A_R(p) + A_C(p))^2 + A_S^2(p)}$ (7)
其中, $A_C(p)$ 为大气吸收衰减 (dB), $A_R(p)$ 为雨衰 (dB), $A_C(p)$ 为云衰 (dB), $A_S(p)$ 为对流层闪烁损耗 (dB)。本文忽略对流层闪烁损耗对通信的影响, 所以总体衰减公式又可以简化为

$A_T(p) = A_C(p) + A_R(p) + A_C(p)$ (8)

其中, 当 $p < 1.0\%$ 时, 那么 $A_C(p) = A_C(1\%)$, $A_C(p) = A_C(1\%)$ 。空地链路信道的综合路径损耗 $A_L(p)$ 可以最终表示为

$A_L(p) = A_F + A_T(p)$ (9)

其中, A_F 为自由空间损耗 (dB)。

2.2 空地链路小尺度衰落建模

接收机收到的信号是发送信号经过不同的路径到达接收机的各个信号的总和, 由于接收机与发射机在短时间或者近距离内产生很小的相对运动, 使得各个信号相互干涉, 而导致信号幅度和相位较大变化的现象, 这种现象叫做小尺度衰落。小尺度衰落一般包含有两种衰落模式: 如果当前存在一个主要的平稳信号部分, 例如视距 (LOS) 传播路径, 那么小尺度衰落可以用 Ricean 模型来描述; 当 Ricean 模型中的主导信号变弱, 复合信号类似于噪声信号时, 信号的包络线为 Rayleigh 分布, 那么衰落模型称作 Rayleigh 模型。

对高空平台站与地面站通信的场景来说, 一般存在 LOS 路径, 因此本文主要对 Ricean 衰落^[13] 进行建模仿真。当为 Ricean 衰落时, 在第 i 时刻衰落幅度 r_i 表示为

$r_i = \sqrt{(x_i + A)^2 + y_i^2}$ (10)

其中, A 为直射波信号的幅度; x_i, y_i 为具有零均值的高斯随机变量, 方差为 σ_0^2 。衰落因子 K 由下式确定:

$K = \frac{A^2}{2\sigma_0^2}$ (11)

Ricean 分布的衰落密度函数可以表示为

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), & A \geq 0, r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases}$$
 (12)

通过考虑非相干的 Ricean 分布衰落序列的产生方法, Ricean 分布的均方值为 $2\sigma_0^2(K+1)$, 其中 σ_0^2 为式 (10) 中的高斯过程的方差。由此, 式 (10) 可以改写为如下形式:

$$r_i = \sqrt{\frac{(x_i + \sqrt{2K})^2 + y_i^2}{2(K+1)}}$$
 (13)

其中, x_i, y_i 为具有零均值的高斯随机变量, 方差为 σ_0^2 。由式 (13) 得到衰落分布包络, 将 r_i 转化为 $r_{i, \text{dB}}$ (dB), 那么式 (13) 可以转化为式 (14):

$$r_{i, \text{dB}} = 10 \lg \frac{(x_i + \sqrt{2K})^2 + y_i^2}{2(K+1)}$$
 (14)

3 硬件在环仿真系统平台

硬件在环仿真又称为半实物仿真, 是一种在仿真系统中接入实物, 以取代相应部分的数学模型的仿真。半实物仿真接口 IP Network Emulator (IPNE) 允许 QualNet 仿真系统直接加载实物, 准确方便地实现了真实节点网络接口与仿真器中模拟节点接口之间数据的实时交互。

在链路建模仿真中, 可以引入半实物仿真技术, 将实物、数学模型和物理模型结合起来组成复杂的链路半实物仿真系统^[14], 以此提高仿真精度, 降低研发成本。基于 QualNet 的半实物仿真系统的仿真结构如图 1 所示。

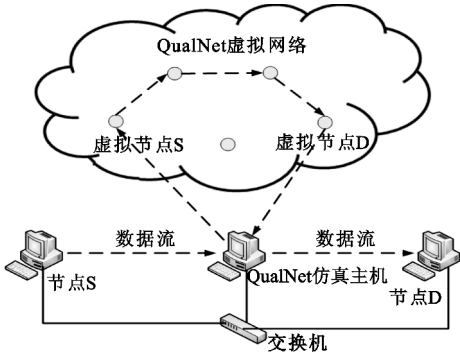


图 1 基于 QualNet 的半实物仿真结构
Fig. 1 The structure of HITL simulation based on QualNet

仿真环境由 3 个通过以太网连接在一起的外接设备组成, 其中 QualNet 主机运行 QualNet 仿真软件, 构造虚拟网, 另外两个外接设备分别作为与虚拟网络中的虚拟节点 S、虚拟节点 D 相互映射的实际

设备。实际节点接口与虚拟节点接口的映射是通过 QualNet 中 IPNE 模块实现的。

4 空地链路信道仿真

4.1 基于 QualNet 的信道模型仿真设计

在无线通信网络中,电波传播对通信链路甚至网络都有一定的影响,但网络仿真器中所具有的简易模型又不能对高空平台空地链路信道进行准确地建模。QualNet 网络仿真器应用广泛,有标准的五层网络架构,具有可扩展性强的特点,本文使用该软件作为仿真工具。通过修改传播模型模块,建立了比已有模型更细致的空地链路信道模型,其信道模型架构如图 2 所示。

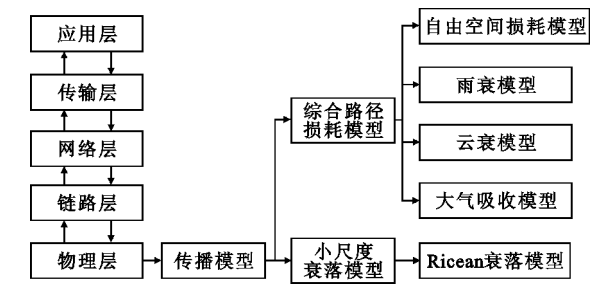


图 2 空地链路信道模型架构

Fig. 2 The architecture of the air-ground link channel model

4.2 仿真实验平台搭建及场景配置

仿真系统中,在虚拟无线链路上视频信息的实时传输是将真实数据注入虚拟无线通信链路,这样可以增加仿真的可信性。由于模拟高空平台站的仿真器是视频流实时传输的平台,将其作为视频流的产生器;模拟地面站的仿真器可以从 QualNet 接收实时的视频流数据,并且显示出来。上述两个仿真器和 QualNet 仿真主机通过同一个交换机的不同端口相连接。实际节点的 IP 地址设置在同一个网段内,将 QualNet 仿真主机的 IP 地址设置为默认网关。硬件在环仿真系统的架构及其配置如图 3 所示。

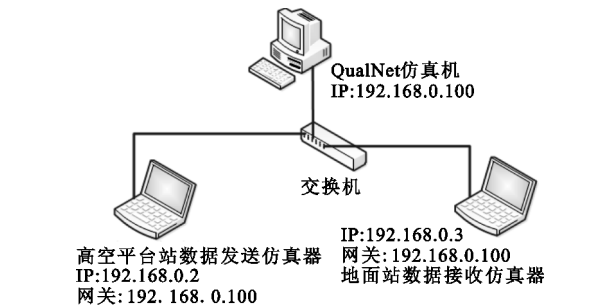


图 3 硬件系统在环仿真架构

Fig. 3 Hardware in the loop simulation architecture

QualNet 的仿真场景中,有一个作为地面基站的固定节点,位于($N20^{\circ}, E110^{\circ}$),一个作为高空平台站的移动节点,该移动节点从固定节点正上方以 200 km/h 的速度向东飞行,飞行高度为海拔 30 km,高空平台站向地面基站每秒钟发送 4 个 512 B 的数据包,链路带宽为 2 Mb/s,仿真时长 30 min。场景配置如图 4 所示。

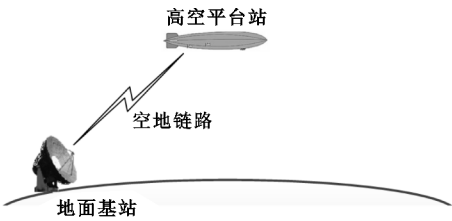


图 4 场景配置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the scenario

物理层涉及的部分参数如表 1 所示。

表 1 物理层主要参数

Table 1 The main parameters of the physical layer

参数	数值
接收机灵敏度/dBm	-102
接收天线增益/dBi	35
发射功率/W	200
发射天线增益/dBi	20
热噪声/K	290
极化方式	垂直极化

该仿真场景所处地域与综合路径损耗有关的部分气象信息如表 2 所示。

表 2 场景部分气象参数

Table 2 Meteorological parameters

参数	数值
超过年均时间 0.01% 的降雨率/(mm/h)	95
超过年均时间 0.1% 的云液态水含量/(kg/m ²)	4
温度中值/($^{\circ}C$)	25
水汽密度/(g/m ³)	7.5

4.3 仿真实验结果与分析

4.3.1 综合路径损耗模型仿真

在仿真实验场景中,空地链路通信频率分别设置为 10 GHz、15 GHz、20 GHz、25 GHz,而其他场景参数保持不变,进行场景仿真,获得超过年均时间 0.01% 的降雨衰减、0.1% 的云衰减和大气吸收衰减的仿真结果,分别如图 5~7 所示,可见雨衰、云衰与大气吸收衰减都随着链路通信频率的增大而增大。在 3 种衰减中,雨衰是影响空地链路通信质量的最

主要因素,而云衰与大气吸收衰减都低于雨衰对链路的影响;而后两者衰减模型的研究对于提高建模仿真的准确度是很必要的。

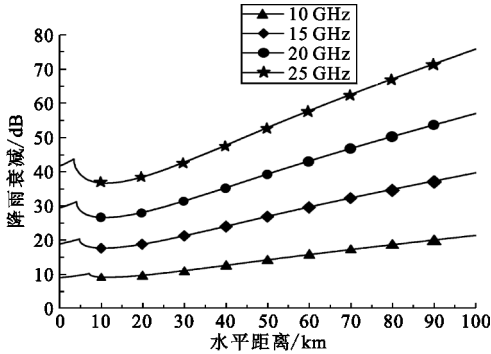


图5 超过年均时间 0.01% 的雨衰减

Fig. 5 Rain attenuation exceeding 0.01% of an average year

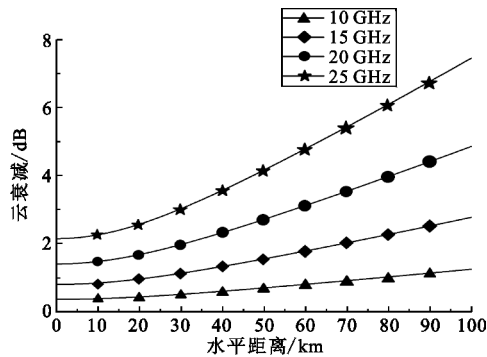


图6 超过年均时间 0.1% 的云衰减

Fig. 6 Cloud attenuation exceeding 0.1% of an average year

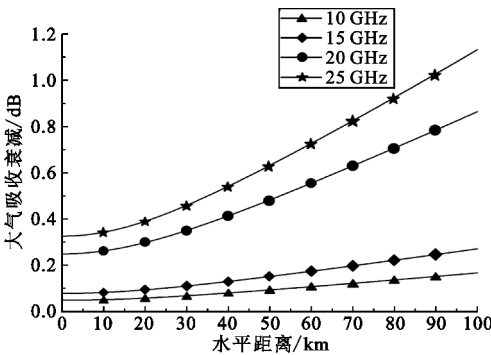


图7 大气吸收衰减值

Fig. 7 Gaseous absorption attenuation

将链路通信频率设定为 20 GHz,分别仿真得到不同时间百分比的雨衰,如图 8 所示。由图可以得出,在超过年均时间 0.1% 和 0.01% 的雨衰较大,而超过年均时间 1% 和 10% 的雨衰都维持在很低的水平,这表明在大部分时间中,雨衰对链路通信影响甚

微。但是当降雨量增大时,极大提高了降雨衰减,严重危害链路的正常通信。在通信链路建立时,要考虑链路冗余,以尽量避免因降雨而造成链路通信的中断,因此,准确的雨衰模型对高空平台通信网络的研究设计至关重要,具有重要的现实意义和应用价值。

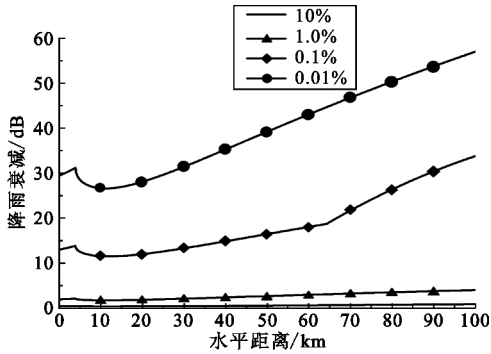


图8 超过年均时间 0.01%、0.1%、1.0% 和 10% 的雨衰减

Fig. 8 Rain attenuation exceeding 0.01%, 0.1%, 1.0% and 10% of an average year

设置空地链路的频率为 20 GHz,时间百分比取 0.1%,传播模型分别设置为自由空间损耗模型和综合路径损耗模型,分别仿真得到两场景下的接收端信号功率变化情况,如图 9 所示。可以看出,当降雨量达到年平均时间的 0.1% 时,大气效应对空地链路通信质量有明显的影响。

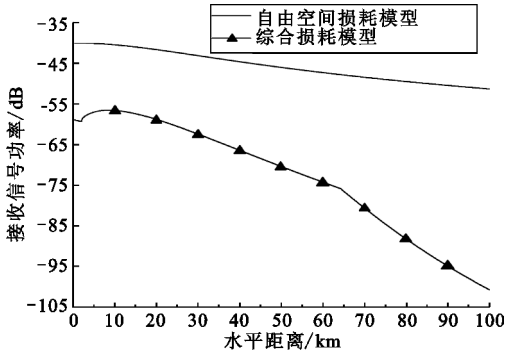


图9 无小尺度衰落情况下接收信号功率图

Fig. 9 Receiving signal power without Ricean fading

4.3.2 小尺度衰落模型仿真

在仿真场景中,由于忽略了地形因素,高空平台站与地面基站之间一直存在可视路径,故 Ricean 衰落模型适用于描述该场景下的小尺度衰落。在下面的仿真实验中,通信频率为 20 GHz。

对于高空平台站与地面基站通信链路的具体场景,一般设置 K factor 为 10 dB,得到由小尺度衰落引起的幅值变化情况,如图 10 所示。

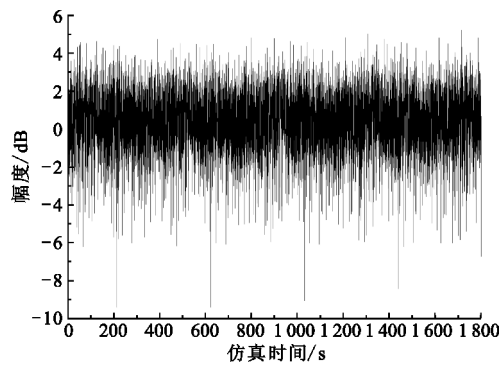


图 10 小尺度衰落幅值
Fig. 10 Ricean fading amplitude

在仿真过程中,将小尺度衰落与综合路径损耗统一计算,得到了地面基站接收到的信号功率,如图 11 所示。

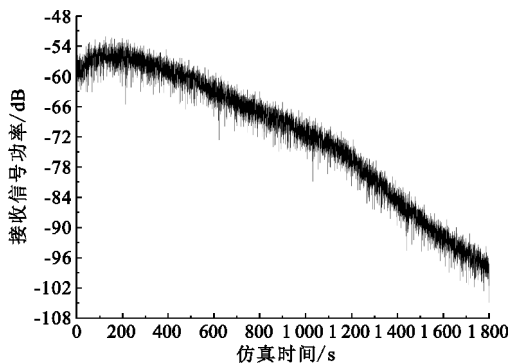


图 11 有小尺度衰落情况下接收信号功率图
Fig. 11 Receiving signal power with Ricean fading

4.3.3 综合信道模型通信仿真

在仿真实验中,通信频率设置为20 GHz,年平均时间百分比取 0.1%,自由空间损耗模型、无 Ricean 衰落的综合损耗模型,以及有 Ricean 衰落的综合损耗模型分别作为仿真实验的传播模型。通过仿真,分别获得各自的数据包投递率,并比较空地链路性能,包投递率如图 12 所示。

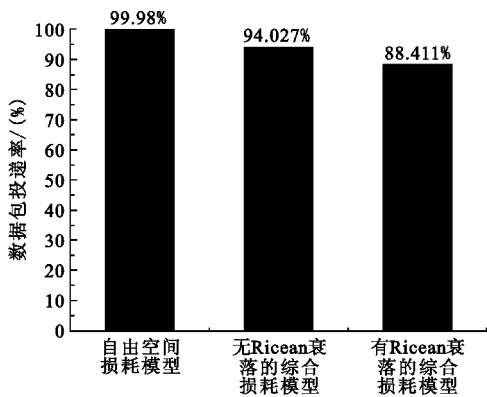


图 12 不同信道模型条件下的包投递率
Fig. 12 Packet delivery rate of different channel model

图 12 中,当传播模型为自由空间损耗模型时,包投递率为 99.98%,将近达到百分之百;当传播模型为无 Ricean 衰落的综合损耗模型时,包投递率为 94.027%,低于自由空间损耗模型;当传播模型为有 Ricean 衰落的综合损耗模型时,包投递率下降到 88.411%,为三者中最低。

在半实物仿真实验中,分别使用自由空间损耗模型、无 Ricean 衰落的综合损耗模型以及有 Ricean 衰落的综合损耗模型作为仿真实验的传播模型,在视频接收节点的显示器上,获取了图 13 所示的 3 幅图像,可清晰地看出空地链路通信质量的差异:自由空间损耗模型下的链路通信质量最好,而有 Ricean 衰落的综合损耗模型下的链路通信质量最差,同时也更接近真实场景。

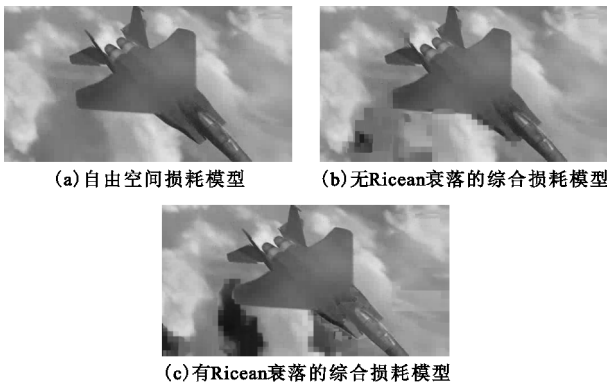


图 13 接收端显示器视频截图
Fig. 13 The video screenshot of the receiving end

5 结 论

本文通过分析降雨、云雾、大气吸收等大气效应引起的衰减以及多径效应引起的衰落,在 QualNet 仿真器中通过编程实现了空地链路信道建模仿真并搭建了半实物仿真平台,该仿真相较于在 Matlab 软件中进行的传统信道仿真来说,可以更广泛地应用于通信系统的研究中,为分析高空平台通信系统的信号覆盖和系统性能优化等提供了现实方法和研究平台。下一步可通过使用 QualNet 与 Matlab 联合仿真更加细化信道建模,相信可以实现更精细的仿真分析。

参考文献:

[1] Dosis F, Fantini R, Mondin M, et al. Small-scale fading for high-altitude platform (HAP) propagation channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communica-

- tions,2002,20(3):641-647.
- [2] Falletti E, Sellone F, Spillard C, et al. A Transmit and Receive Multi-Antenna Channel Model and Simulator for Communications from High Altitude Platforms[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2006, 13(1):59-75.
 - [3] Yang Yong, Zong Ru, Gao Xinbo, et al. Channel modeling for High-Altitude platform; A review[C]//Proceedings of 2010 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Chengdu: IEEE, 2010: 1-4.
 - [4] 施春强, 郭道省. 一种新的临近空间通信信道模型及其仿真分析[J]. 电讯技术, 2012, 52(5): 741-747.
SHI Chun-qiang, GUO Dao-xing. A Novel Near Space Communication Channel Model and its Simulation Analysis[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(5): 741-747. (in Chinese)
 - [5] Recommendation ITU-R P. 618-10, Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space Telecommunication system[S].
 - [6] Recommendation ITU-R P. 838-3, Specific attenuation model for rain for use in prediction methods[S].
 - [7] Recommendation ITU-R P. 839-3, Rain height model for prediction methods[S].
 - [8] Recommendation ITU-R P. 837-6, Characteristics of precipitation for propagation modeling[S].
 - [9] Stutzman W L, Dishman W K. A simple model for the estimation of rain induced attenuation along earth space paths at millimeter wavelengths [J]. Radio Science, 1982, 17(6):1465-1476.
 - [10] Dissanayake A, Allnut J, Haidara F. A Prediction Model that Combines Rain Attenuation and other Propagation Impairments Along Earth-Satellite Paths [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1997, 45(10):1546-1558.
 - [11] Recommendation ITU-R P. 840-5, Attenuation due to clouds and fog[S].
 - [12] Recommendation ITU-R P. 676-9, Attenuation by atmospheric gases[S].
 - [13] Punnoose R J, Nikitin P V, Stancil D D. Efficient Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator[C]//Proceedings of 2000 IEEE Vehicular Technology Conference. Boston, USA: IEEE, 2000:764-767.
 - [14] 赖安琪. 基于 QualNet 的战术数据链半实物仿真[J]. 电讯技术, 2009, 49(5):74-77.
LAI An-qi. Hardware-in-the-Loop Simulation of Tactical Data Link(TDL) based on QualNet[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(5):74-77. (in Chinese)

作者简介:



郑 艺(1988—),男,河北人,2011 年获学士学位,现为电子科技大学硕士研究生,主要研究方向有无线自组织网络、电波传播模型等;

ZHENG Yi was born in Hebei Province, in 1988. He received the B. S. degree in 2011. He is now a graduate student. His research concerns wireless Ad-hoc network and radio propagation model, etc.

Email: zhy_uestc@163. com

王玉文(1962—),男,吉林省吉林市人,电子科技大学航空航天学院副教授,主要从事航空航天电子领域的研究工作;

WANG Yu-wen was born in Jilin, Jilin Province, in 1962. He is now an associate professor. His research concerns aeronautics and astronautics electronics.

邓 杰(1989—),男,湖南人,2012 年获学士学位,现为电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为电磁环境仿真、无线自组网等;

DENG Jie was born in Hunan Province, in 1989. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student. His research concerns electromagnetic environment simulation and wireless ad-hoc network, etc.

尚小富(1990—),男,重庆人,2012 年获学士学位,现为电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为无线自组网、电波传播模型等。

SHANG Xiao-fu was born in Chongqing, in 1990. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student. His research concerns mobile ad-hoc network and radio propagation model, etc.